

ИНФОРМАЦИОННО-ЛИМНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАРАСТАНИЯ ЛЬДА НА ВОДОЕМАХ БЕЛАРУСИ



П. И. Кирвель¹

Доцент кафедры экологии
БГУИР, кандидат геогра-
фических наук, доцент



Д. А. Мельниченко¹

Заведующий кафедрой
экологии БГУИР, канди-
дат технических наук,
доцент



Е. В. Новиков²

Директор Института
современных технологий
связи, кандидат
технических наук, доцент

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

E-mail: ecolog@bsuir.by

²Белорусская государственная академия связи, Республика Беларусь

Abstract. The article deals with such resource-intensive task as modelling the dynamics of processes of ice formation and melting of ice. The model is based on a physical law, established during field research, which takes into account stratification of the air and water temperatures. For the work in limited computing resources are offered suitable for practical use empirical relationships, reflecting the dynamics of the maximum thickness of the ice on weather conditions. The results of modelling are presented in the form of mapping schemes of the average long-term maximum ice thickness for the Republic of Belarus reservoirs.

Решение широкого круга задач, связанных с моделированием динамики функционирования гидрологических объектов, является достаточно сложной задачей, требующей значительных вычислительных ресурсов и хранения больших объемов данных, особенно когда речь идет о высокой точности моделирования, а не о получении качественных результатов.

Для условий нашей республики весьма актуальной задачей является моделирование процессов льдообразования и таяния льда. Важно это, например, для прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций на водных объектах в период таяния льда.

Рассмотрим информационно – лимнологическую модель нарастания льда. В основу модели положена установленная в полевых исследованиях физическая закономерность, учитывающая стратификацию температур воздуха и воды, когда в определенные периоды обнаруживается тенденция участия эндогенного тепла в процессе оттаивания льда. Дело в том, что наблюдаемое физическое явление проявляется при отрицательной температуре воздуха и оно гораздо чаще и продолжительнее явления при стационарной отрицательной величине, когда имеет место застаивание льда. Этот факт не учитывается ни в одном из

известных соотношений, хотя многие формулы учитывают такой момент, как увеличение толщины льда, так как наблюдается прирост суммы отрицательных температур.

В основу физической модели положен баланс тепловых потоков. За границу расчета тепловых потоков принята нулевая изотерма, положение которой переменна во времени и расположена она на нижней границе льда. Процесс замерзания воды неустановившийся. Однако в силу того, что данные метеостанций, например, по температуре воздуха выводятся в виде среднесуточной величины, то допускаем, что процесс замерзания воды за данный отрезок времени установившийся. Для данного интервала времени можно записать, что тепловой поток, проходящий через слой снега и льда до нулевой изотермы, равен [1]:

$$-g_1 = \frac{\Delta t_{cp}}{\left(\frac{h_{CH}}{\lambda_{CH}} + \frac{h_m}{\lambda_m} \right)}, \quad (1)$$

где Δt_{cp} – перепад температуры, равный среднесуточной температуре поверхности снега, °С;

h_{CH} , h_m – толщина слоя снега и льда, см;

λ_{CH} , λ_m – теплопроводность снега и льда (Вт/м °С).

Навстречу направлен глубинный теплоток воды:

$$+g_2 = \frac{t_{const}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\lambda_i} \right)}, \quad (2)$$

где t_{const} – перепад температуры, равный примерно постоянной температуре воды (4°С);

λ_i – теплопроводность i -го слоя воды;

$\sum_{i=1}^n h_i$ – слой воды.

Суммарный тепловой поток за расчетный период запишется в виде:

$$g = -g_1 + g_2 . \quad (3)$$

Выражая приращение толщины льда (ΔH_{mi}), как функцию результирующего теплового потока, получим:

$$\Delta H_{mi} = f(g) . \quad (4)$$

Обработка экспериментальных данных озёр Беларуси позволила установить общую закономерность распределения связи двух величин, которая аппроксимируется уравниванием вида

$$y = \operatorname{Arsh}x = \ln(x + (x^2 + 1)) . \quad (5)$$

Тогда конечное выражение для определения приращения суточной толщины льда примет вид:

$$\Delta H_{mi} = k \cdot \ln \left(\left(- \left(\frac{\Delta t}{h_{CH}} + \frac{h_m}{\lambda_m} \right) \right) + \frac{t_{const}}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i}} + \left(- \left(\frac{\Delta t}{h_{CH}} + \frac{h_m}{\lambda_m} \right) + \frac{t_{const}}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i}} \right)^2 + 1 \right) \quad (6)$$

где k – поправочный коэффициент расчёта; Δt – градиент изменения температуры воздуха.

Фазовые превращения воды наблюдаются при переходе текущей температуры через 0°C . Основными источниками тепла для превращения льда или снега в воду являются коротковолновая радиация и турбулентный теплообмен приземного воздуха.

В отдельных случаях на интенсивность их таяния влияет тепло поступающих дождевых капель. В условиях облачности и большой влажности поступает также тепло за счет фазовых переходов, например, тепло, выделяемое при конденсации или аблимации. Фактически, главным условием начала таяния снега или льда является наступление положительных температур воздуха. Однако до окончания этого процесса температура поверхности не превышает 0°C , что препятствует нагреванию нижележащих слоев и уменьшает их среднюю суточную температуру. В суточном ходе снеготаяния на льду отмечают четыре фазы: 1 – утреннее прогревание верхнего слоя снега до 0°C ; 2 – дневное снеготаяние; 3 – вечернее охлаждение; 4 – ночное промерзание снега [2]. Ночью, даже если не происходит промерзания снега, интенсивность таяния низкая, так как основное количество тепла, полученное в результате турбулентного теплообмена приземной атмосферы, идет на компенсацию потерь тепла длинноволновым излучением. Расчет суточной интенсивности таяния (h_m) снега или льда ведется по зависимости вида [3]:

$$h_m = \alpha \cdot (\theta - \theta_0)^\beta , \quad (7)$$

где θ – температура воздуха $^\circ\text{C}$;

θ_0 – температура начала таяния $^\circ\text{C}$;

α, β – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, количественная оценка хода ледотаяния позволяет дать прогноз процессов толщины льда. Особенно важна количественная оценка хода формирования ледяного покрова в период образования и таяния льда.

Приращение глубины таяния (ΔH_{ti}) за расчетный интервал времени

рассматривается как результирующая процесса теплопередачи, исходя из физических явлений теплоотдачи и теплопроводности:

$$\Delta H_{mi} = \lambda_2 \cdot \left(\frac{t_i}{\pm \Delta B_i} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{H_{mi-1}}{\lambda_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (8)$$

где t_i – средняя температура воздуха за расчетный период, °С;

$\pm \Delta B_i$ – изменение теплозапасов льда;

H_{i-1} – величина растаявшего слоя льда на начало расчетного интервала времени ($i-1$);

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, систем: приземная атмосфера – поверхность льда, лёд – вода;

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности, соответственно, воды и льда

Полная глубина растаявшего слоя льда на конкретную дату рассматриваемого интервала времени определится как:

$$H_{mi} = H_{mi-1} + \Delta H_{mi}. \quad (9)$$

Для условий ограниченности имеющихся вычислительных ресурсов, нами предложены пригодные для практического применения эмпирические зависимости, отражающие динамику максимальной толщины льда от метеоусловий (рисунок 1).

Эти зависимости аппроксимируются уравнением:

$$h_{\max} = \alpha t^2 + \beta t + c, \quad (10)$$

где t – сумма декадных температур за зимний период (декабрь-февраль),

α, β, c – эмпирические коэффициенты (табл. 1).

Таблица 1 – Основные эмпирические коэффициенты расчётных зависимостей.

озеро	α	β	c	R^2
Освейское	-0,0031	-0,7366	22,81	0,78
Нещердо	-0,004	-0,7869	18,822	0,51
Дривяты	-0,0044	-0,7435	20,384	0,56
Мястро	-0,0031	-0,7307	20,09	0,80
Нарочь	-0,0049	-0,8426	18,669	0,68
Выгонощанское	-0,0006	-0,4554	23,526	0,78
Червоное	-0,0033	-0,6285	21,189	0,70

По результатам расчётов построена картосхема среднегодовой максимальной толщины льда, которая отражает пространственную дифференциацию количественных показателей максимальной толщины льда, осреднённой за многолетний зимний период (декабрь-февраль). Анализ результатов моделирования показал высокую степень корреляции с опытными расчётными картами отрицательных температур, предоставляемыми

гидрометеослужбой Республики Беларусь (рис 2).

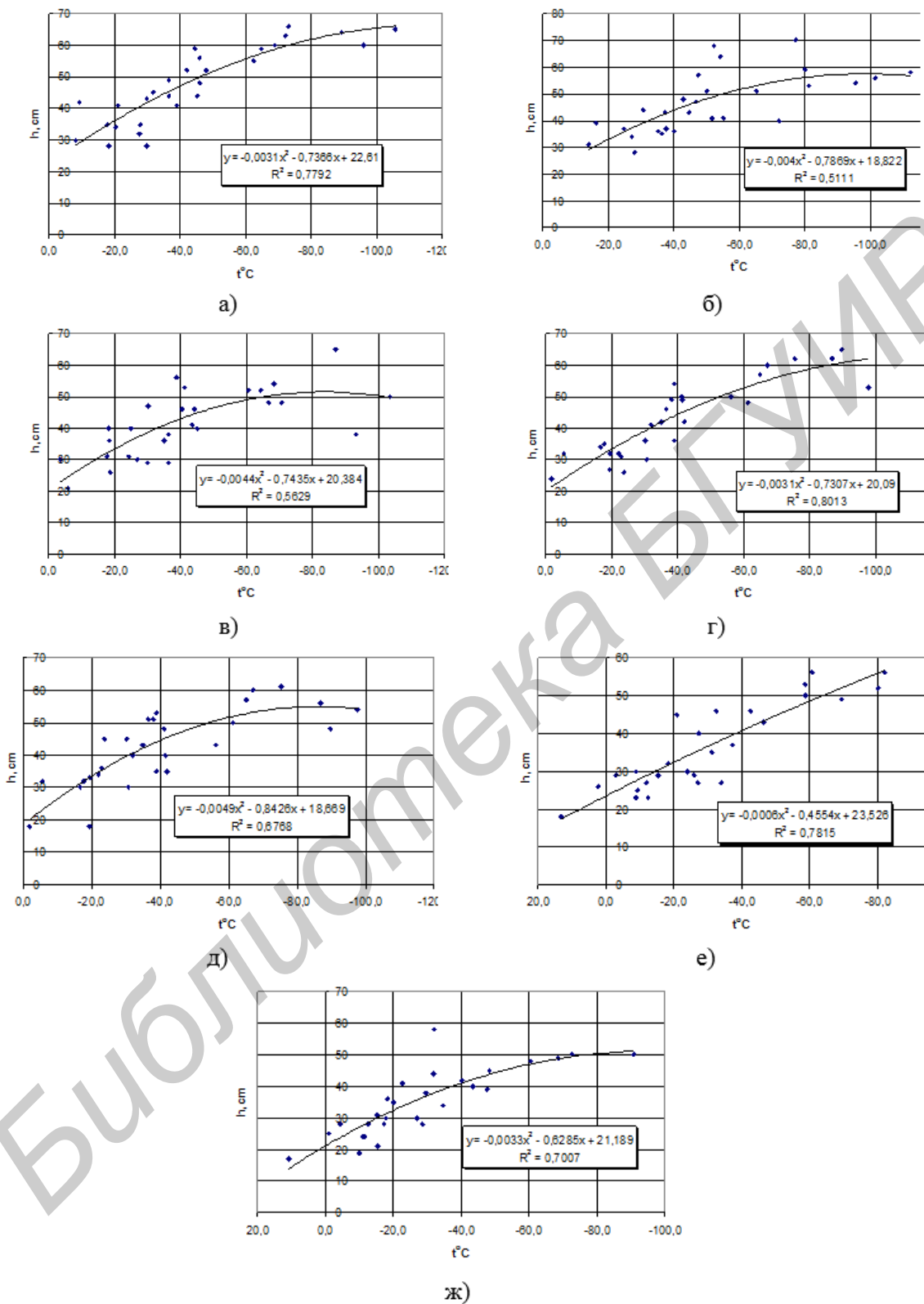


Рис. 1. Зависимости максимальной толщины льда от суммы декадных температур за 30-летний период декабрь-февраль на озёрах: а) Освейское; б) Нещердо; в) Дривяты; г) Мястро; д) Нарочь; е) Выгонощанское; ж) Червоное

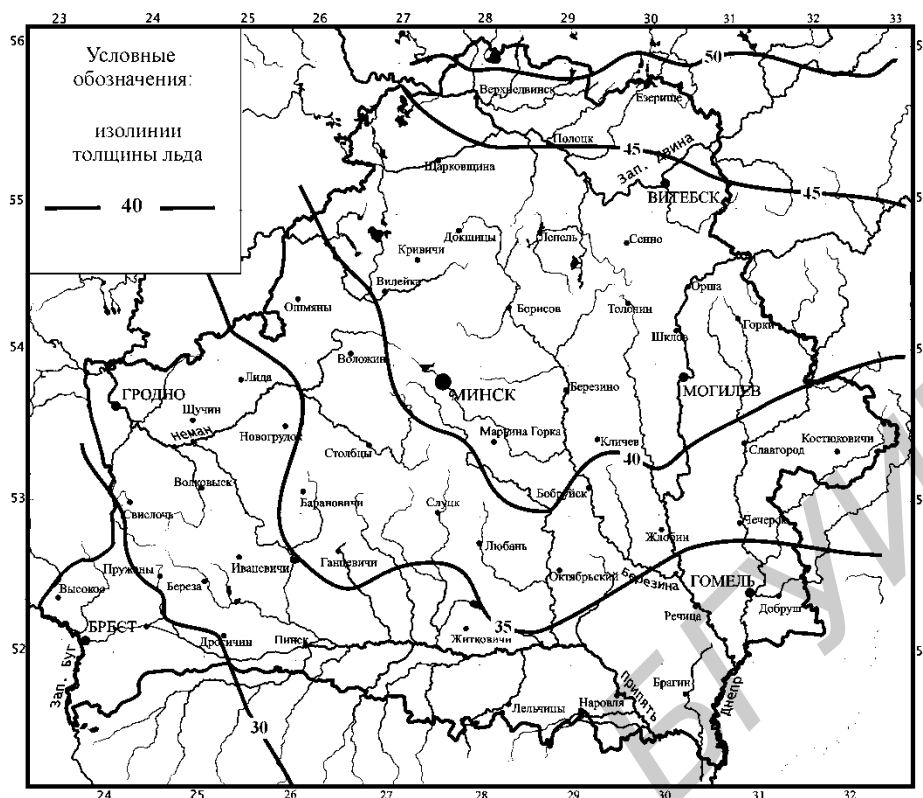


Рис. 2. Картограмма величин максимальной толщины льда, осреднённая за тридцатилетний холодный период (декабрь-февраль)

Литература

- [1]. Дюнин А. К. Испарение снега/ А. К. Дюнин – Новосибирск: СО АН СССР, 1961. – 120с.
- [2]. Кирвель, П.И. Оценка толщины льда озёр Беларуси в условиях изменяющегося климата/ П.И. Кирвель //Науки о Земле и цивилизация: Материалы Международной молодежной конференции, 18-22 октября 2012 г., Санкт-Петербург. Том 1. Науки о Земле / Под общ. ред. Е.М. Нестерова. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2012. – С. 149–153.
- [3]. Кирвель, П.И. Результаты мониторинга и моделирования нарастания льда озёр в условиях изменяющегося климата/ П.И. Кирвель, А.Zieliński, А. Chojiński // Мониторинг окружающей среды: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 25-27 сентября 2013 г.: в 2ч./ Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина; редкол.: И.В. Абрамова [и др.]. – Брест: БрГУ, 2013. –Ч.1. – С. 110–112.